

ERSCHÜTTERUNGS- UND KÖRPERSCHALLPROBLEME BEI WASSERKRAFTWERKEN

Marcel Birchmeier, ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich, CH

1 Einleitung

An den vielen Flüssen im Alpenraum befinden sich zahlreiche kleine und grosse Wasserkraftwerke, welche den Höhenunterschied zwischen aufgestautem Oberlauf und dem Unterlauf zur Produktion von elektrischer Energie ausnutzen. Bei einem Flusskraftwerk ist der Wasserdruck niedrig, hingegen die durch die Turbine strömende Wassermenge pro Zeit relativ gross. Die wichtigsten Komponenten eines Flusskraftwerks sind das Stauwehr mit Überlauf (siehe Bild 1.1 links) und das Maschinengebäude (Bild 1.1 rechts) mit Wassereinflussbauwerk und Rechen, Turbinen mit Generatoren und dem Wasserauslaufbauwerk (Saugrohr). Bild 1.2 zeigt einen schematischen Längsschnitt durch das Maschinengebäude eines Flusskraftwerks.



Bild 1.1 Kleinkraftwerk an der Aare in Interlaken

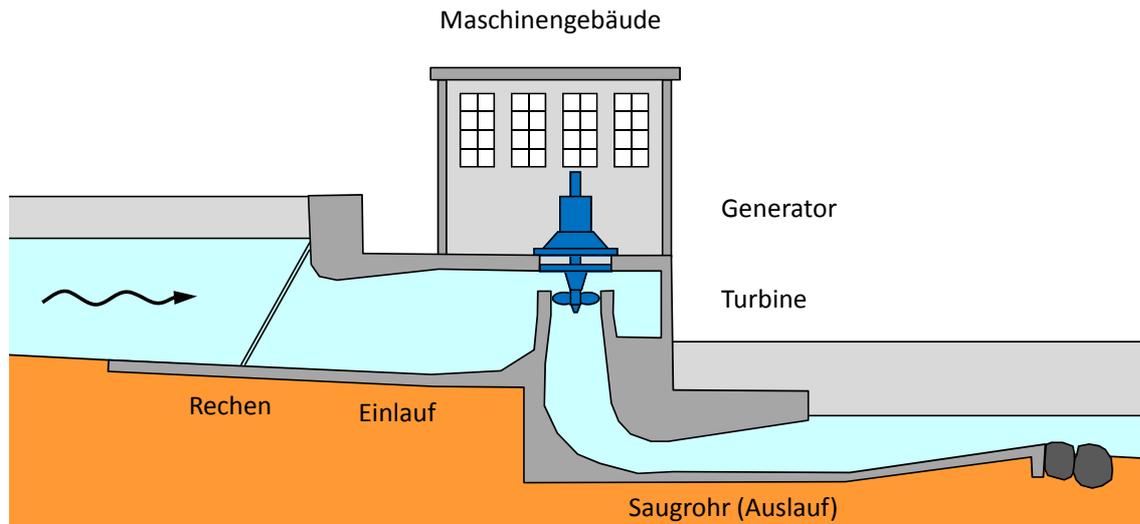


Bild 1.2 Längsschnitt durch ein Flusskraftwerk

Mit Wasserkraftwerken lässt sich auf ökologische Weise elektrische Energie erzeugen, was stark zu ihrer Beliebtheit und Akzeptanz in der Bevölkerung beiträgt. Um die Stromproduktion zu erhöhen werden heute viele bestehende Kraftwerke erneuert oder ausgebaut. Kleinstkraftwerke werden Jahrzehnte nach ihrer Stilllegung wieder ans Netz genommen, da die möglichgewordene Vollautomatisierung einen effizienten Betrieb erlaubt. Noch werden eher selten Kraftwerke an neuen Standorten erstellt, dies könnte sich aber je nach zukünftiger Energiestrategie schnell ändern.

Neben den positiven Aspekten können Wasserkraftwerke aber auch Ursache von störenden Immissionen in benachbarten Wohnbauten sein. Ein Wasserkraftwerk verbreitet einerseits direkten Schall verursacht durch das strömende oder fallende Wasser, die Generatoren (summen), Lüftungsanlagen oder regelmässige Reinigungsarbeiten (Rechenreinigung). Andererseits können die grossen Wassermassen in turbulenter Strömung und die rotierende Einheit aus Turbine und Generator zu starken Erschütterungen und Vibrationen führen, die in das umliegende Erdreich abgestrahlt und über relativ weite Distanzen getragen werden. Dies kann in benachbarten Gebäuden zu wahrnehmbaren Erschütterungen und Körperschall führen.

Bezüglich Reduktion des Direktschalls wird heutzutage bei einem Kraftwerksumbau viel Aufwand betrieben, wie z.B. Schallisolierung des Maschinenraums, schallgedämpfte Lüftungsanlagen, Schallschutzfenster sowohl beim Maschinengebäude als auch bei den benachbarten Gebäuden oder sogar Fischtrepfen mit geringer Schallentwicklung. Solche Massnahmen sind richtig und wirkungsvoll, sie führen aber oftmals dazu, dass der bereits vorher vorhandene Körperschall nun besser wahrnehmbar wird. Dieser von den Erschütterungen des Wohngebäudes verursachte, sekundäre Schall ist im Vergleich zum Direktschall viel tieffrequenter und ist als dumpfes, zum Teil an- und abschwellendes Grollen hörbar. Erschütterungen und Körperschall können bereits bei geringer Stärke zu Beeinträchtigungen der Lebensqualität führen, wie z.B. Schlafstörungen oder Unbehagen.

Viele Wasserkraftwerke befanden sich bei ihrer Erstellung in Industriegebieten oder genügend weit weg von Wohngebieten. In der heutigen Zeit führt der steigende Siedlungsdruck jedoch dazu, dass an den attraktiven Flusslagen neue Wohnbauten auch in Kraftwerksnähe erstellt werden oder eine Industriezone mit Kraftwerk in eine Wohnzone umgewandelt wird. Somit liegen immer häufiger Kraftwerke und Wohnbauten nahe beieinander, was

zu Konflikten zwischen den verschiedenen Interessengruppen führen kann. Verstärkt wird die Problematik zusätzlich durch die steigenden Ansprüche an die Wohnqualität, insbesondere bei Wohneigentum. Bereits geringe Beeinträchtigungen können zu Klagen gegen den Kraftwerksbetrieb führen.

Für den Bauingenieur stellt sich die Problematik der Erschütterungen und des Körperschalls bei Wasserkraftwerken zumeist in einer der folgenden drei Formen:

1. Ein Wasserkraftwerk wird umgebaut, neugebaut oder wieder in Betrieb genommen. Bevor ein solches Projekt realisiert werden kann, ist zu prüfen, ob kein Gebäude im Einflussbereich des Kraftwerks in unzulässiger Weise beeinträchtigt wird. Allenfalls müssen geeignete Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen getroffen werden.
2. Ein neues Wohngebäude, eine ganze Überbauung oder eine Produktionsstätte mit hochempfindlichen Anlagen soll in der Nähe eines bestehenden Kraftwerks gebaut werden. Auch hier ist zu untersuchen, ob die zukünftigen Immissionen im zulässigen Rahmen bleiben oder ob allenfalls beim Bau des projektierten Gebäudes Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen und des Körperschalls getroffen werden müssen.
3. Bewohner eines bestehenden Gebäudes neben einem bestehenden Kraftwerk beschweren sich über zu starke Immissionen. Es ist zu prüfen, ob die vorhandenen Immissionen vom Kraftwerk verursacht werden und ob sie zumutbar sind. Gegebenenfalls sind Massnahmen zu entwickeln, um die Immissionen zu reduzieren.

Das Ziel dieses Beitrags ist auf die angesprochene Problematik der Erschütterungen und des Körperschalls bei Wasserkraftwerken aufmerksam zu machen und die wichtigsten Vorgänge bei der Ausbreitung der Erschütterung etwas zu beleuchten, da deren Verständnis die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Problemlösung ist. Zunächst werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die verschiedenen Problembereiche beschrieben und mögliche Massnahmen skizziert. Anschliessend werden anhand von Messdaten beim Kraftwerk in Interlaken (Bild 1.1) die wichtigsten Aspekte bei der Erschütterungsübertragung veranschaulicht.

2 Theoretische Grundlagen

Zur Beschreibung der wichtigsten Vorgänge bei der Ausbreitung der Erschütterung werden das Kraftwerk, das Erdreich und das Gebäude betrachtet. Die Erschütterungen und Vibrationen entstehen bei der Quelle (Kraftwerk) und breiten sich über das Medium (Erdreich) bis zum Empfänger (z.B. Person im Gebäude) aus. Bild 2.1 zeigt schematisch den Weg der Ausbreitung.

Die einzelnen Vorgänge werden im Folgenden kurz beschrieben, wobei es nicht um die mathematische Beschreibung gehen soll, sondern vielmehr um das physikalische Verständnis der Vorgänge. Hierzu ist es meist aufschlussreicher die Vorgänge im Frequenzbereich, d.h. mit Amplitudenspektren zu betrachten, als die Zeitsignale selbst, die sich aus vielen sich überlagernden Einzelsignalen zusammensetzen. Im Abschnitt 2.6 wird dann auf die Zusammenhänge der Vorgänge für die Gesamtübertragung eingegangen. Am Ende des Kapitels werden in Tabelle 2.1 die wichtigsten Aspekte der einzelnen Vorgänge nochmals zusammengestellt.

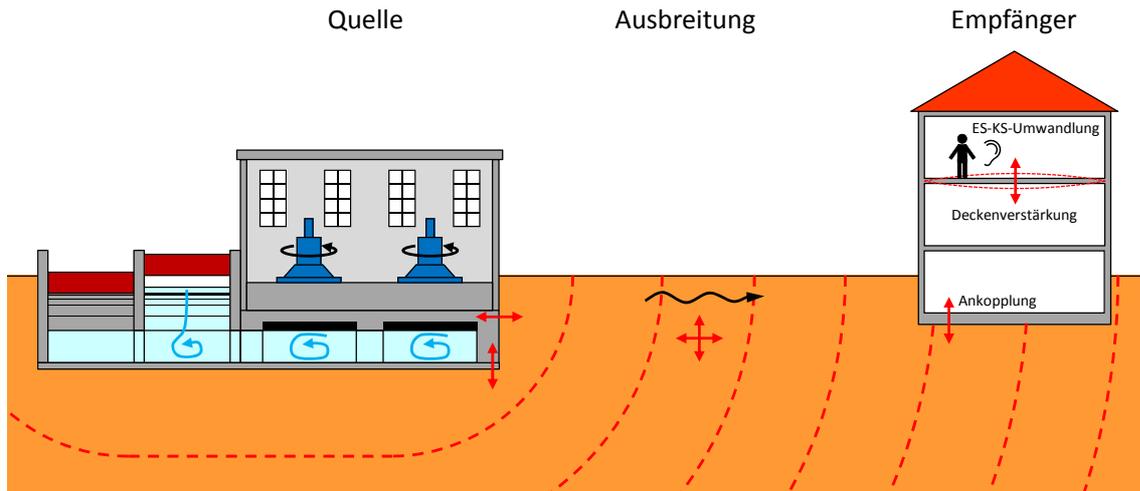


Bild 2.1 Ausbreitung der Erschütterungen von der Quelle (Kraftwerk) bis zum Empfänger (Person im Gebäude)

2.1 Quellspektrum

Das Quellspektrum setzt sich aus den Erschütterungen und Vibrationen ausgehend von verschiedenen Quellen zusammen. Die einzelnen Erschütterungen überlagern sich, dabei werden sowohl die Zeitsignale als auch die Frequenzspektren miteinander summiert. Die Erschütterungen gehen ursprünglich von der rotierenden Einheit aus Turbine und Rotor des Generators und den bewegten Wassermassen aus. Das strömende Wasser, Turbulenzen und Wirbelablösungen führen zu grossen Druckschwankungen, welche die umgebenden Bauteile in Schwingung versetzen können. Es kann unterschieden werden zwischen:

- **Turbine/Generator:** Turbine und Generator erzeugen eine Schwingung in der Grundfrequenz der Umdrehung und deren Vielfachen. Die einzelnen Peaks sind im Frequenzspektrum sehr schmalbandig (nadelförmig, siehe Bild 2.2).
- **Tragstruktur der Turbine/Generators:** Angeregt durch die Schwingung des Generators und/oder der strömenden Wassermassen kann die Tragstruktur (Stahlkonstruktion oder Betonplatte) in ihren Eigenfrequenzen schwingen. Die Peaks sind eher schmalbandig.
- **Einlauf- und Auslaufbauwerk:** Durch ihre Eigenschwingungen können sie die Erschütterungen, die durch die Wassermassen verursacht werden, zusätzlich verstärken. Der Frequenzinhalt ist sehr breitbandig mit teils wellenartigen Peaks (siehe Bild 2.2).
- **Wasserüberlauf:** Das herunterstürzende, stark verwirbelte Wasser verursacht Erschütterungen mit breitbandigem Frequenzinhalt. Meist ist dies mit starken Lärmemissionen verbunden.

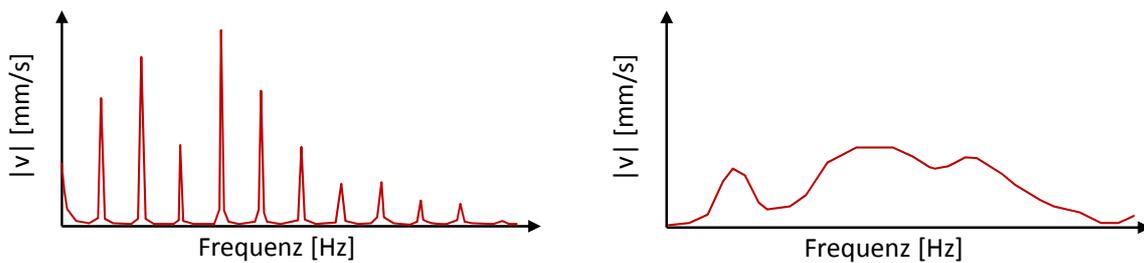


Bild 2.2 Schematische Darstellungen des Frequenzspektrums beim Generator (links) und beim Auslaufbauwerk (rechts).

Speziell bei Flusskraftwerken im Vergleich zu vielen anderen Störungsquellen ist der Betrieb während 24 Stunden pro Tag, d.h. die Immissionen können vor allem in den sonst ruhigen Nachtstunden am besten wahrgenommen werden. Das Quellspektrum kann stark variieren je nach Betriebszustand des Kraftwerks oder wegen schwankenden Durchflussmengen. Auch kann es wetterbedingt zu tage- bis monatelangen Perioden mit geringer oder starker Immissionen kommen. Es ist auch abzuklären, ob die störenden Immissionen häufig auftreten oder nur während seltenen Hochwassersituationen.

Die fortlaufende Anregung hat noch einen weiteren Effekt. Selbst Frequenzen mit kleinen Amplituden können ein System mit geringer Dämpfung zu starken Schwingungen anregen, sofern die Frequenz der Anregung mit der Eigenfrequenz des Systems zusammenfällt (Resonanzphänomen).

2.2 Wellenausbreitung im Boden

Ausgehend von einer harmonischen Anregung an der Oberfläche breiten sich im Erdreich (Halbraum) verschiedene Wellen aus. Es gibt Raumwellen, die sich in alle Richtungen im Halbraum ausbreiten und Oberflächenwellen, die sich nur an der Oberfläche des Halbraums fortbewegen. Die Wellen regen ein Bodenpartikel zu horizontalen und vertikalen Bewegungen an. Durch die unterschiedlichen, auch räumlich verteilten Quellen und die verschiedenen Wellentypen mit unterschiedlichen, z.T. frequenzabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten ergibt sich im umliegenden Gebiet um das Kraftwerk ein chaotisches Wellenbild, wie wenn man eine Hand voll Kieselsteine in einen ruhigen Teich wirft. Für die Übertragung der Erschütterung von der Quelle zum Empfänger ist aber nur die Abminderung der Amplituden mit grösser werdendem Abstand von Bedeutung. Diese Abminderung setzt sich aus zwei Effekten zusammen:

- **Geometrische Dämpfung:** Die Amplituden einer Welle nehmen mit der Distanz zur Quelle ab, da sich der durch die Welle beanspruchte Raum vergrössert. Bei einer Punktquelle ist die Abminderung für eine Raumwelle grösser als für eine Oberflächenwelle.
- **Materialdämpfung:** Die Amplituden einer Welle nehmen wegen Energieverluste durch innere Reibung mit der Zeit und somit auch mit der Distanz ab. Dieser Effekt ist frequenzabhängig: Wellenanteile bei hohen Frequenzen werden stärker gedämpft als jene bei tiefen Frequenzen.

Stark vereinfachend lassen sich die beiden Effekte zusammengefasst mit dem Ansatz

$$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n(f)}$$

beschreiben. Hierbei ist v_0 die Geschwindigkeit eines Bodenpartikels im Abstand r_0 von der Quelle, v die Geschwindigkeit im Abstand r und n ein von der Frequenz f abhängiger Exponent. Bild 2.3 zeigt zwei Messreihen bei verschiedenen Flusskraftwerken zusammen mit der theoretischen Abminderung bei einer Punktquelle ohne Materialdämpfung für eine Raumwelle ($n = 2$, skaliert auf den ersten Messpunkt) und für eine Oberflächenwelle ($n = 0.5$, dito). Die Beispiele zeigen, dass sich die Abminderung von Fall zu Fall stark unterscheiden und teils erstaunlich gering sein kann. Auch wird am Beispiel einer der beiden Messreihe die Frequenzabhängigkeit des Exponenten gezeigt, wobei bei höheren Frequenzen grössere Werte und somit eine stärkere Dämpfung beobachtet werden können.

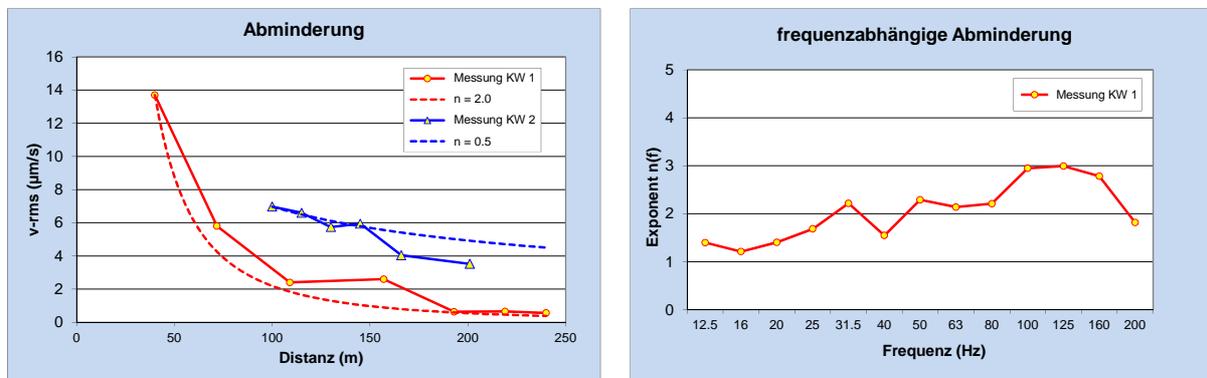


Bild 2.3 Abminderung mit der Distanz für eine Raumwelle ($n = 2$) und eine Oberflächenwelle ($n = 0.5$) und Messdaten von verschiedenen Kraftwerken (links) und aus den Messdaten bestimmter Exponent berechnet pro Terzband (rechts).

2.3 Ankopplung

Beim Übergang vom Baugrund auf das Gebäude werden die Erschütterungen in der Regel abgemindert. Einen guten Einblick in diesen „Ankopplungseffekt“ erhält man bei der Betrachtung des üblicherweise für Maschinenfundamente angewendeten Einmassenschwingers (siehe Bild 2.4) auf einem idealen Halbraum. Der Boden wird dabei als ein Feder-Dämpfungselement modelliert, dessen Steifigkeit und Dämpfung sich aus den Boden-Kennwerten, der Grundfläche des Fundaments und der Masse berechnet. Das Verhältnis der Schwingungsamplituden im Gebäude zu denen im Baugrund lassen sich mit der Übertragungsfunktion (auch Transferspektrum genannt) für den Einmassenschwinger in Funktion der Frequenz darstellen. Bild 2.4 zeigt den typischen Verlauf dieser Funktion, falls eine tiefe Eigenfrequenz ($f_0 = 10$ Hz) und grosse Dämpfung ($D = 1.4$) angenommen wird, wie sie bei schwereren Gebäuden üblich sind. Zusätzlich sind die aus vielen Messungen mit Eisenbahnerschütterungen idealisierten Übertragungsfunktionen für ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus dargestellt. Wie die Messungen gezeigt haben, steigen entgegen der Einmassenschwinger-Analogie bei Frequenzen ab 50 Hz die Übertragungsfaktoren wieder an.

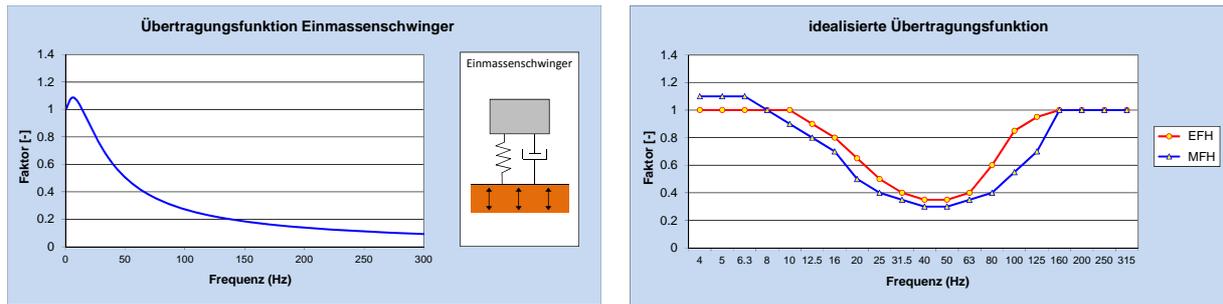


Bild 2.4 Übertragungsfunktion des Einmassenschwingers mit $f_0 = 10$ Hz und $D = 1.4$ (links) und die idealisierten Übertragungsfunktionen für Ein- und Mehrfamilienhäuser, dargestellt als Terzbandspektrum (rechts)

2.4 Deckenschwingung

Das Schwingverhalten der Geschossdecke bildet zumeist den wichtigsten Einflussfaktor in der gesamten Übertragungskette. Eine einzelne Eigenschwingungsform (der Biegeschwingung) der Geschossdecke kann in erster Näherung als Einmassenschwinger modelliert werden. In Bild 2.5 ist die Übertragungsfunktion für eine Eigenfrequenz von $f_0 = 30$ Hz und einer Dämpfung von $D = 0.05$ dargestellt als typisches Beispiel für die 1. Eigenschwingung einer Betondecke im Wohnungsbau. Frequenz, Höhe und Breite des Peaks hängen von den Abmessungen, der Masse, den Lagerungsart, der Steifigkeiten und der Dämpfung der Decke ab. Die grösste Verstärkung ergibt sich bei der Anregung der Platte um deren Resonanzfrequenz (eng begrenzter Frequenzbereich). Ein Faktor von 10 oder mehr ist durchaus realistisch. Bezogen auf die gesamte Erschütterung im gesamten Frequenzbereich liegt der Verstärkungsfaktor wesentlich tiefer. Bei Betondecken liegt die Verstärkung in der Regel zwischen 2 und 4, bei Holzdecken zwischen 3 und 6.

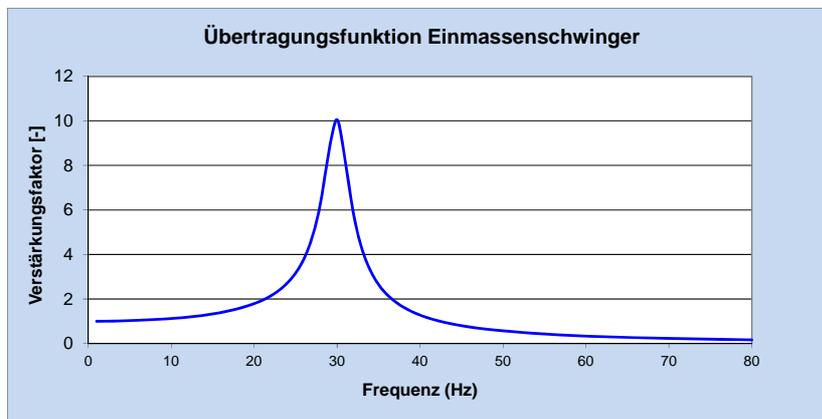


Bild 2.5 Übertragungsfunktion des Einmassenschwingers mit $f_0 = 20$ Hz und $D = 0.05$.

Tiefe Eigenfrequenzen ergeben sich für weiche Platten (Holz) und für Platten mit grossen Spannweiten, eher hohe Eigenfrequenzen für steife Platten (Beton) und für kleine Spannweiten. Typische Werte liegen zwischen 10 Hz und 50 Hz für die 1. Eigenfrequenz.

2.5 Körperschall

Der sekundäre, abgestrahlte Schall (oder Körperschall) wird durch die Schwingungen des Fussbodens, der Decke und der Wände erzeugt, vergleichbar mit einem Lautsprecher. Die vertikale Bewegung des Fussbodens erzeugt eine Druckwelle im Luftraum über dem Fussboden, welche – falls sie im hörbaren Frequenzbereich liegt – als Schall wahrgenommen werden kann. Die Untergrenze des für den Körperschall relevanten Frequenzbereichs liegt bei der Hörgrenze von 25 Hz, die Obergrenze zwischen 125 Hz und 200 Hz.

Das menschliche Ohr ist auf den Schalldruck empfindlich. Diese Grösse lässt sich mit der Schwinggeschwindigkeit der Decke in Beziehung bringen. Das Verhältnis von Schalldruck zu Schwinggeschwindigkeit ist frequenzabhängig. Bild 2.6 zeigt die Übertragungsfunktionen (ES-KS-Transferspektrum in Terzbänder) von der Erschütterung der Geschossdecke zum Körperschall von zwei Messungen in Gebäuden neben Kraftwerken und die aus zahlreichen Messungen mit Eisenbahnerschütterungen idealisierte Übertragungsfunktion. Es zeigt sich, dass ab Frequenzen von 63 Hz der Umwandlungsfaktor grösser wird. Oberhalb 100 Hz steigt die Streuung in den Messdaten sehr stark an, da die gemessenen Amplituden sehr klein sind und die Division von Schalldruck durch Erschütterung keine zuverlässigen Werte mehr ergibt. Daher wird ab 100 Hz die idealisierte Übertragungsfunktion als konstant angenommen.

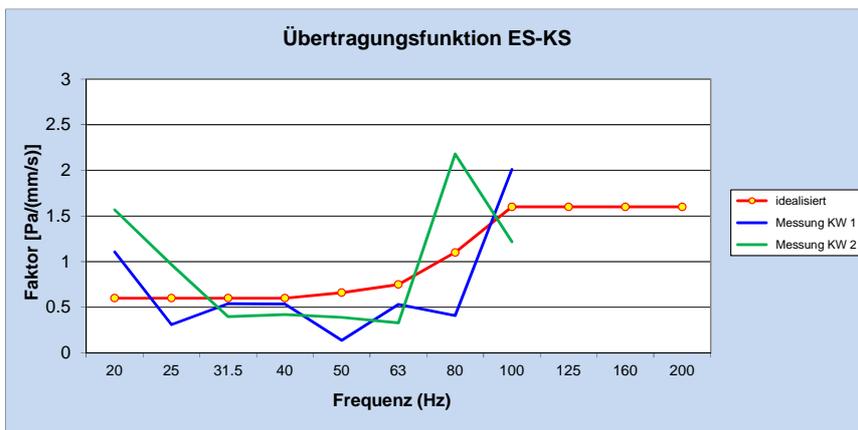


Bild 2.6 Aus zahlreichen Messungen idealisierte Übertragungsfunktion für die Umwandlung von Erschütterungen der Geschossdecke in Körperschall.

2.6 Gesamtübertragung

Die Gesamtübertragung setzt sich aus den zuvor beschriebenen Effekten zusammen. Bild 2.7 zeigt schematisch den Vorgang von der Quelle bis zum Empfänger. Links sind die einzelnen Effekte aufgezeigt, rechts das aus jedem Vorgang resultierende Amplitudenspektrum entlang des Ausbreitungswegs. Der für die Gesamtübertragung relevante Frequenzbereich beschränkt sich auf Frequenzen zwischen 0 Hz und 300 Hz.

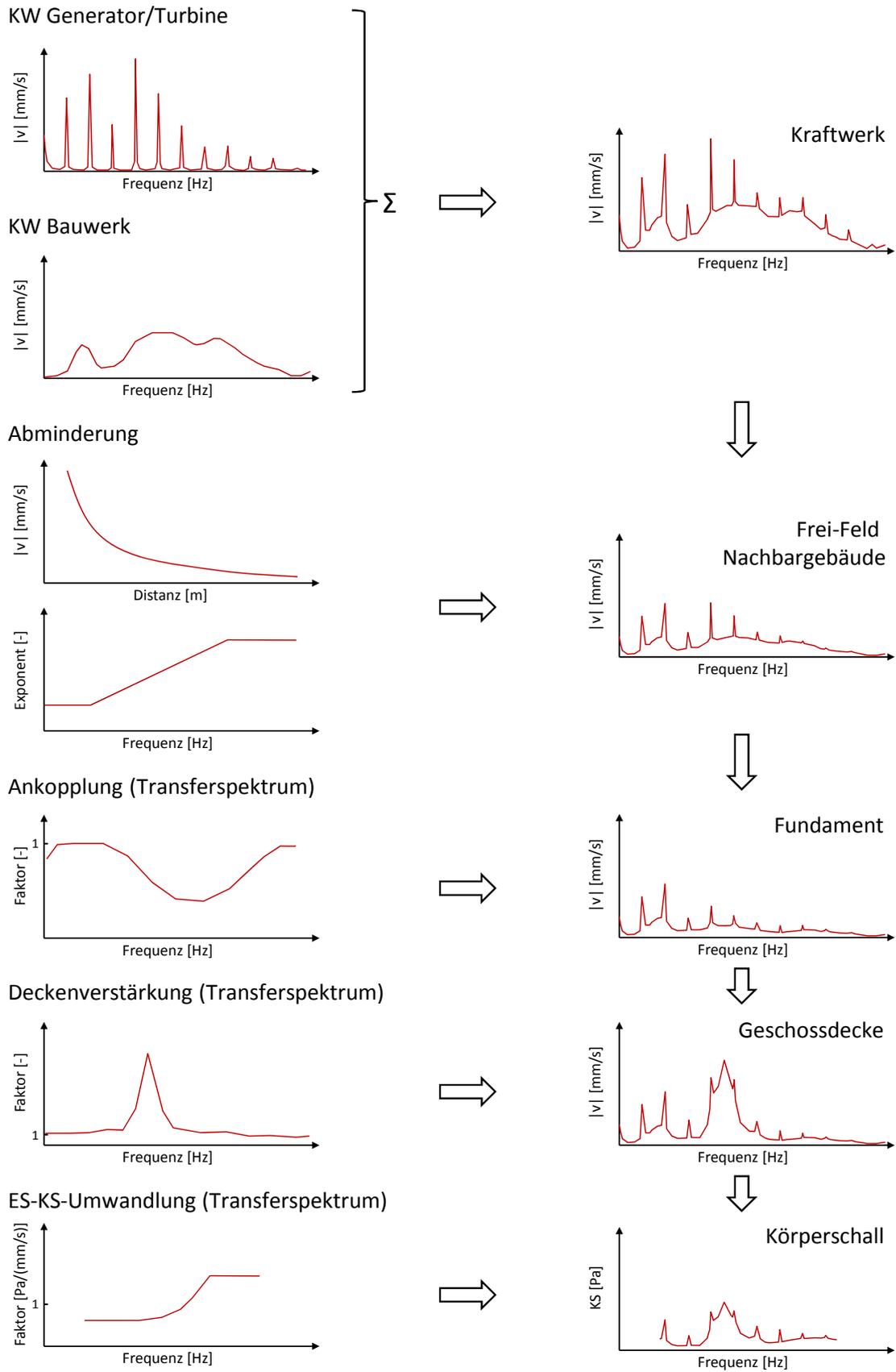


Bild 2.7 Herleitung der Gesamtübertragung im Frequenzbereich

- **Quellspektrum:** Die Überlagerung (Summe) der einzelnen Erschütterungen führt zu einem Spektrum mit schmalbandigen Peaks aber auch breitbandigem Frequenzinhalt. Diese Erschütterungen können an einem Fundamentpunkt des Kraftwerks oder unmittelbar neben dem Kraftwerk an der Bodenoberfläche beobachtet werden. Der wesentliche Energiegehalt steckt nicht in den einzelnen Peaks, sondern vielmehr in den breitbandigen Anteilen.
- **Abminderung:** Mit zunehmender Distanz zum Kraftwerk nehmen die Amplituden ab. Dabei werden die Anteile bei höheren Frequenzen stärker gedämpft als bei tieferen Frequenzen, was dazu führen kann, dass die Anteile im oberen Frequenzbereich gänzlich verschwinden.
- **Ankopplung:** Das Frei-Feld-Spektrum neben dem Gebäude wird mit dem Ankopplungstransferspektrum multipliziert. In der Regel kommt es zu einer Abminderung der Erschütterungsamplituden über den gesamten Frequenzbereich. Die Erschütterungen im Gebäude sind über die gesamte Fundamentfläche ungefähr gleich. Ausser den hohen Frequenzen sind nach wie vor dieselben Frequenzen vorhanden wie im Quellspektrum.
- **Deckenverstärkung:** Die Erschütterungen im Fundament breiten sich im gesamten Gebäude aus und bringen insbesondere Geschossdecken zum Schwingen. Das Spektrum für die Geschossdecke erhält man durch Multiplikation des Fundamentspektrums mit der entsprechenden Übertragungsfunktion der Decke (Deckenverstärkung). Wegen der fortlaufenden Anregung können bereits kleine Amplituden bei einer Frequenz gleich der Eigenfrequenz einer Decke ausreichen, um diese zu relativ starken Schwingungen anzuregen (Resonanzphänomen). Dieser Effekt ist besonders stark ausgeprägt, wenn eine Frequenz des Generators mit der Eigenfrequenz der Decke zusammenfällt.
- **Umwandlung Erschütterung-Körperschall:** Das Spektrum des von der Geschossdecke abgestrahlten Körperschalls erhält man durch Multiplikation des Deckenspektrums mit der Übertragungsfunktion (ES-KS-Umwandlung). Dabei werden höhere Frequenzen besser umgewandelt als tiefe Frequenzen. Bei einer anschliessenden A-Bewertung werden die hohen Frequenzen zusätzlich stärker gewichtet, weshalb diesen Anteilen – sofern überhaupt vorhanden – bei einer Untersuchung besondere Beachtung geschenkt werden sollte.

Grundsätzlich sind die oben beschriebenen Vorgänge gleich für vertikale und horizontale Schwingungen. Unterschiedlich können jedoch deren Charakteristik und Einfluss auf die Gesamtübertragung sein. Die Erfahrung zeigt, dass für Körperschallprobleme in der Regel die vertikalen Schwingungen ausschlaggebend sind, da die Geschossdecken stärker schwingen als die Wände. Bei Erschütterungsproblemen sind bei Wasserkraftwerken a priori immer alle drei Raumrichtungen zu berücksichtigen.

Auf dem Weg durch das Erdreich vom Kraftwerk bis zum Haus werden die höheren Frequenzen stark abgeschwächt und kommen gar nicht bis zur Geschossdecke. Somit sind Frequenzen grösser als 250 Hz für die Gesamtübertragung kaum relevant.

Der für den Körperschall massgebende Frequenzbereich beschränkt sich auf Frequenzen von 25 Hz bis etwa 200 Hz. Oberhalb ist eine Unterscheidung zwischen Körperschall und Einflüssen von Direktschall bei Messungen im Feld kaum mehr möglich.

Durch die fortlaufende Anregung in einem breiten Frequenzband kann es neben Resonanzen auch zu Schwebungen zweier Schwingungen mit beinahe gleicher Frequenz kommen. Eine Schwebung zeigt sich als periodisch an- und abschwellende Immission. Ähnliche Immissionen können aber auch durch Turbulenzen und Wirbel im Wasser verursacht werden.

Die physikalischen Vorgänge sind dieselben wie bei der Erschütterungsausbreitung bei Eisenbahnen. Es ändert sich lediglich die Anregungsart: kontinuierliche statt kurzzeitige Anregung, unterschiedliches Frequenzspektrum und an Ort bleibende Punktquelle statt eine sich bewegende Quelle. Letzteres führt zu einer unterschiedlichen Abminderung. Die Übertragungsfunktionen der Ankopplung, der Deckenverstärkung und der Körperschall-Umwandlung sind aber unabhängig von der Anregungsart und daher können auch Mittelwertspektren von Messungen bei Eisenbahnen herangezogen werden.

In Tabelle 2.1 sind die verschiedenen Aspekte der Erschütterungsausbreitung von der Quelle bis zum Empfänger nochmals zusammengefasst.

Tabelle 2.1 Zusammenstellung der verschiedenen Aspekte der Erschütterungsausbreitung

Quelle: Kraftwerk	Ausbreitung	Empfänger: Gebäude
<p>Turbine/Generator</p> <ul style="list-style-type: none"> extrem schmalbandig Peaks bei Grundfrequenz des Generators und deren Vielfachen <p>Tragstruktur Turbine/Generator</p> <ul style="list-style-type: none"> schmalbandig Peaks bei Eigenfrequenzen der Tragstruktur <p>Einlauf/Saugrohr</p> <ul style="list-style-type: none"> breitbandig Peaks bei Eigenfrequenzen der Bauteile <p>Überlauf</p> <ul style="list-style-type: none"> breitbandig auch starker Direktschall 	<p>Verschiedene Wellen</p> <ul style="list-style-type: none"> Raum- und Oberflächenwellen Überlagerungen vertikale und horizontale Schwingungen <p>Geometrische Dämpfung</p> <ul style="list-style-type: none"> Punktquelle: Abnahme der Amplituden mit der Distanz <p>Materialdämpfung</p> <ul style="list-style-type: none"> materialabhängig frequenzabhängig: hohe Frequenzen werden stärker gedämpft als tiefe <p>Vereinfachtes Abminderungsgesetz</p> $v = v_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)}$ <ul style="list-style-type: none"> n ungefähr zwischen 0.5 und 2.5 Frequenzen grösser 250 Hz grösstenteils weggedämpft 	<p>Ankopplung</p> <ul style="list-style-type: none"> je schwerer das Gebäude, desto schlechter die Ankopplung frequenzabhängig Faktoren meist kleiner 1 <p>Deckenverstärkung</p> <ul style="list-style-type: none"> abhängig vom Deckentyp (Holz- oder Betondecken) starke Erhöhung bei Eigenfrequenzen der Decke (Faktor 10 und mehr) <p>ES-KS-Umwandlung</p> <ul style="list-style-type: none"> Frequenzabhängig: bessere Umwandlung bei höheren Frequenzen Frequenzen zwischen 25 Hz und 200 Hz

3 Problembereiche

Aus den physikalischen Überlegungen, aber auch aus den Erfahrungen von zahlreichen Untersuchungen stellen sich verschiedene Problembereiche heraus, die im Speziellen bei Wasserkraftwerken auftreten können und oftmals übersehen werden.

3.1 Das Kraftwerk als Ganzes

Betrachtet man die Gesamtübertragung, so ergeben sich beim Empfänger (Person in einem Raum) nur dann Erschütterungs- oder Körperschallprobleme, wenn die Geschossdecke genügend stark in Schwingung versetzt wird. Dies kann einerseits der Fall sein, wenn die Frequenzen des Generators mit einer Eigenfrequenz der Decke übereinstimmen, andererseits können wegen der kontinuierlichen Erschütterung auch bereits die z.T. kleinen Anteile aus der breitbandigen Anregung, z.B. des Saugrohrs, dafür ausreichend sein. Dies bedeutet, dass nicht alleine der Generator, sondern vielmehr alle schwingungsrelevanten Komponenten des Kraftwerks (Generator/Turbine, Ein-/Auslaufbauwerk, Wasserüberlauf, sonstige Anlagen wie Ventilatoren, etc.) als Verursacher der Immissionen betrachtet werden müssen. Dies bestätigt auch ein Beispiel aus der Praxis, wo trotz Schwingungsisolierung des Generators (elastische Lagerung) Körperschall im Nachbargebäude gut wahrgenommen wird. Die Erfahrung zeigt, dass der Generator und das Auslaufbauwerk (Saugrohr) in etwa zu gleichen Teilen zur Gesamterschütterung beitragen. Für eine genauere Aussage sind allerdings weitere Untersuchungen notwendig.

3.2 Unbekannte Ausbreitung

Einen wichtigen Einfluss bei der Gesamtübertragung spielt auch die Abminderung infolge der Erschütterungsausbreitung. Die Abminderung ist von vielen, meist unbekanntem Faktoren abhängig, wie z.B. den Bodeneigenschaften. Wie Messungen bei einem Wasserkraftwerk gezeigt haben, kann die Abminderung mit der Distanz erstaunlich gering sein, was dazu geführt hat, dass auch die projektierten Häuser in grösserer Distanz zum Kraftwerk von störenden Immissionen betroffen gewesen wären. Die effektiv vorhandene Abminderung ist daher von Fall zu Fall anhand von Messungen zu untersuchen, am aussagekräftigsten ist natürlich eine Frei-Feld-Messung in unmittelbarer Nähe des Empfängers. Wichtig scheint das Bewusstsein darüber, dass der Einflussbereich des Kraftwerks bezüglich störenden Erschütterungen und Körperschall relativ gross sein kann und sich gut bis zu einem Radius von 150 m um das Kraftwerk herum ausdehnen kann.

3.3 Einwirkung auf Menschen

Die Wahrnehmung der Erschütterungen und des Körperschalls ist sehr subjektiv. Bereits geringe Immissionen können von den Anwohnern als störend empfunden werden. Speziell bei Wasserkraftwerken ist deren kontinuierlicher Betrieb auch nachts, wenn es bis auf das Kraftwerk sehr ruhig ist.

Über die Empfindlichkeit des Menschen auf Dauererschütterungen oder Dauerkörperschall ist noch relativ wenig bekannt. Normengrenzwerte für diesen Aspekt existieren nicht. Grundsätzlich müsste man anstreben, dass in Wohnungen sowohl Dauererschütterungen als auch Dauerkörperschall nicht wahrgenommen werden sollten. Damit stellt sich die Frage nach der Wahrnehmungsgrenze.

Bei Erschütterungen ist bekannt, dass die Mehrheit der Menschen Vibrationen unterhalb von 0.2 mm/s nicht mehr wahrnehmen. Allerdings können etwa 5 % der Menschen auch noch Vibrationen von 0.1 mm/s spüren.

Beim Körperschall hängt die Wahrnehmungsgrenze sehr stark vom Hintergrundschallpegel ab. Zur Illustration sind in Tabelle 3.1 die wichtigsten Messdaten von 6 Wasserkraftwerken zusammengestellt. Bei den Kraftwerken Haslen und Hard handelt es sich um Kleinkraftwer-

ke, bei den übrigen um mittlere bis grosse Wasserkraftanlagen. Beim Kraftwerk Windisch wird der Körperschall von 22 dBA von einem Wasserüberlauf vor dem Gebäude übertönt und wird daher als nicht störend empfunden. Hingegen beim Kraftwerk Bremgarten mit nur sehr geringem Hintergrundschaallpegel werden die 23 dBA bereits als störend wahrgenommen.

Tabelle 3.1 Messdaten bei 6 verschiedenen Wasserkraftwerken

Kraftwerk	Distanz zwischen Gebäude und Turbine	Erschütterungen (v_{max}) auf dem Gebäudefundament	Erschütterungen (v_{max}) in Mitte Fussboden	Körperschall in Raummitte	Wahrnehmung durch Bewohner
Haslen	20 m	0.040 mm/s	0.250 mm/s	30 dBA	Störend
Interlaken	10 m	0.045 mm/s	0.060 mm/s	35 dBA	Störend
Hard / Winterthur	10 m	0.037 mm/s	0.070 mm/s	34 dBA	Störend
Windisch	20 m	0.030 mm/s	0.030 mm/s	22 dBA	Nicht störend
Augst / Felber	100 m	0.015 mm/s	0.060 mm/s	18 dBA	Nicht störend
Bremgarten	150 m	0.040 mm/s	0.060 mm/s	23 dBA	Störend

Diese Daten zeigen folgendes:

- Körperschall von Wasserkraftanlagen über 30 dBA wird eindeutig als störend beurteilt.
- Körperschall von Wasserkraftanlagen unter 20 dBA wird eindeutig als nicht störend beurteilt.

Die tiefen Werte der Immissionen, die bereits als störend wahrgenommen werden, führen neben der z.T. geringen Abminderung zusätzlich dazu, dass der bei einem Projekt in Betracht zu ziehende Einflussbereich des Kraftwerks genügend gross gewählt werden muss. Auch muss für abklärende Messungen die untere Grenze des Messbereichs genügend klein sein (bis 1 μ m/s bei Erschütterungsmessungen).

4 Massnahmen

Störende Immissionen können mit baulichen Massnahmen entweder bei der Quelle oder beim Empfänger effizient reduziert werden. Die dazu notwendigen Eingriffe kann man in der Regel nur bei einem Neubau oder während eines umfassenden Umbaus des Kraftwerks oder eines benachbarten Gebäudes vornehmen. Darum ist es wichtig, bereits zu Beginn der Projektierungsphase gewisse Abklärungen zu machen, um ungewollte Probleme im Nachhinein zu vermeiden. Folgend werden die verschiedenen Massnahmen grob skizziert.

4.1 Bauliche Massnahmen

Als bauliche Massnahme kommt hauptsächlich die elastische Lagerung der schwingungsrelevanten Bauteile in Frage. In Bild 4.1 sind die verschiedenen Möglichkeiten beim Kraftwerk (Quelle) dargestellt. Auf die elastische Lagerung im Allgemeinen und deren Dimensionierung und Ausführung wird hier nicht weiter eingegangen.

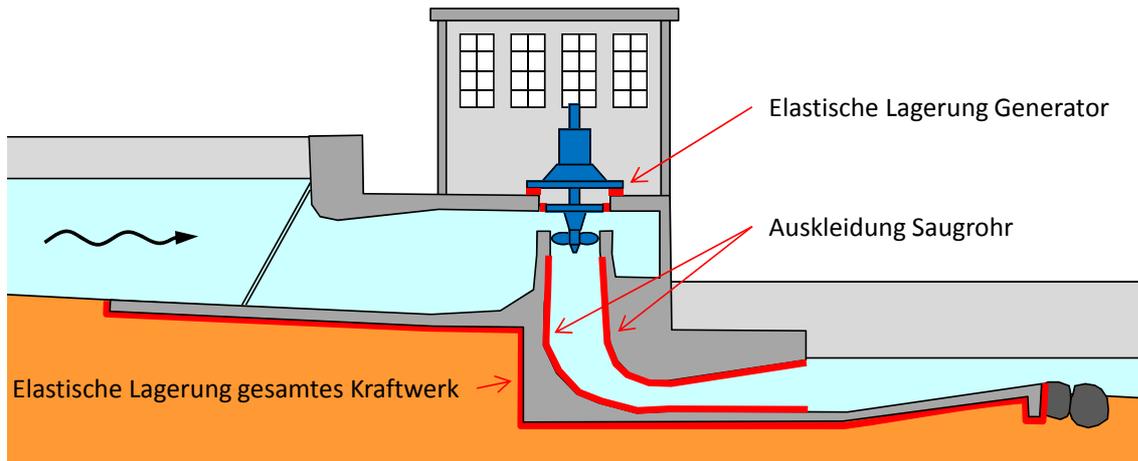


Bild 4.1 Verschiedene bauliche Massnahmen beim Kraftwerk

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt, verursachen bei einem Wasserkraftwerk neben dem Generator auch die anderen Komponenten, insbesondere das Saugrohr starke Erschütterungen. Daher wäre es am effizientesten, das gesamte Kraftwerk elastisch zu lagern. Dies kann in der Regel nur bei einem Neubau des Kraftwerks vorgenommen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die elastische Lagerung des Generators, womit jedoch nur der entsprechende Teil der Erschütterungen reduziert wird. Um bei einem bestehenden Kraftwerk das Saugrohr zu isolieren, kann man dessen Innenseite mit entsprechendem Isolationsmaterial und einer starken Schutzschicht auskleiden. Diese Massnahme ist jedoch mit sehr viel Aufwand verbunden.

Das Nachbargebäude (Empfänger) kann mit einer elastischen Lagerung von den Erschütterungen im Erdreich abgeschirmt werden. Vor allem die für den Körperschall relevanten Frequenzen ab 30 Hz lassen sich damit effizient reduzieren. Erfahrungsgemäss ist der Körperschall bei Wasserkraftwerken häufiger problematisch als die Erschütterungen.

Eine Frequenzabstimmung der Geschosdecken als weitere Massnahme ist wegen der breitbandigen und sich verändernden Anregung nur bedingt sinnvoll. Möglich wäre auch eine entsprechend ausgeführte Schlitzwand unmittelbar vor dem Nachbargebäude, die die Oberflächenwellen stark abschwächt. Reflektionen an Bodenschichten, Beugungseffekte und die oftmals grossen Abmessungen des Kraftwerks können den Effekt einer Schlitzwand jedoch stark reduzieren, auch sind nur wenige Erfahrungen mit dieser Massnahme vorhanden.

4.2 Sonstige Massnahmen

Bereits zu Beginn der Projektierungsphase eines Neu- oder Umbaus eines Kraftwerks oder eines Wohnungsneubaus in Kraftwerksnähe sollte abgeklärt werden, ob in den benachbarten Gebäuden/Neubauten Erschütterungs- und Körperschallprobleme entstehen könnten. Hierzu sind, sofern ein Kraftwerk bereits besteht, Messungen vor Ort unumgänglich. Neben Erschütterungsmessungen im Frei-Feld sind Erschütterungs- und Körperschallmessungen in bereits bestehenden Gebäuden innerhalb des Einflussbereichs des Kraftwerks sehr aufschlussreich. Die Messungen bilden dann die Grundlage für eine Beurteilung oder für die Berechnung der zu erwartenden Immissionen im zukünftigen Zustand. Bei diesen Abklärungen muss auf folgendes geachtet werden:

- Der Perimeter sollte schon zu Beginn genügend gross gewählt werden.

- Bei der Beurteilung der Mess- oder Prognoseresultaten sollten die Grenzwerte für die Erschütterungen und insbesondere des Körperschalls genügend tief angesetzt werden.

Bei bestehendem Kraftwerk und bestehenden Gebäude, dessen Bewohner sich über störende Immissionen beklagen, gilt es oftmals abzuklären, ob die Immissionen tatsächlich vom Kraftwerk herrühren. Dazu müssen entsprechende Messungen vorgenommen und die Resultate interpretiert und beurteilt werden. In der Regel geht eine bauliche Veränderung beim Kraftwerk, dem Wohngebäude oder auf dem Weg dazwischen (z.B. ein Brückenfundament) mit dem Beginn der störenden Immissionen einher. Ohne aufwändige bauliche Eingriffe bleibt in diesem Fall oft nur die betriebliche Einschränkung des Kraftwerks übrig.

5 Beispiel

Bei einem Wasserkraftwerk in Interlaken (siehe auch Bild 1.1) war ein Maschinenersatz geplant, weshalb in den beiden nächstgelegenen Gebäuden die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen vorgängig untersucht wurden. Bild 5.1 zeigt die Position der einzelnen Messpunkte. Auf Frei-Feld-Messungen wurde wegen dem geringen Abstand der Gebäude zum Kraftwerk verzichtet.

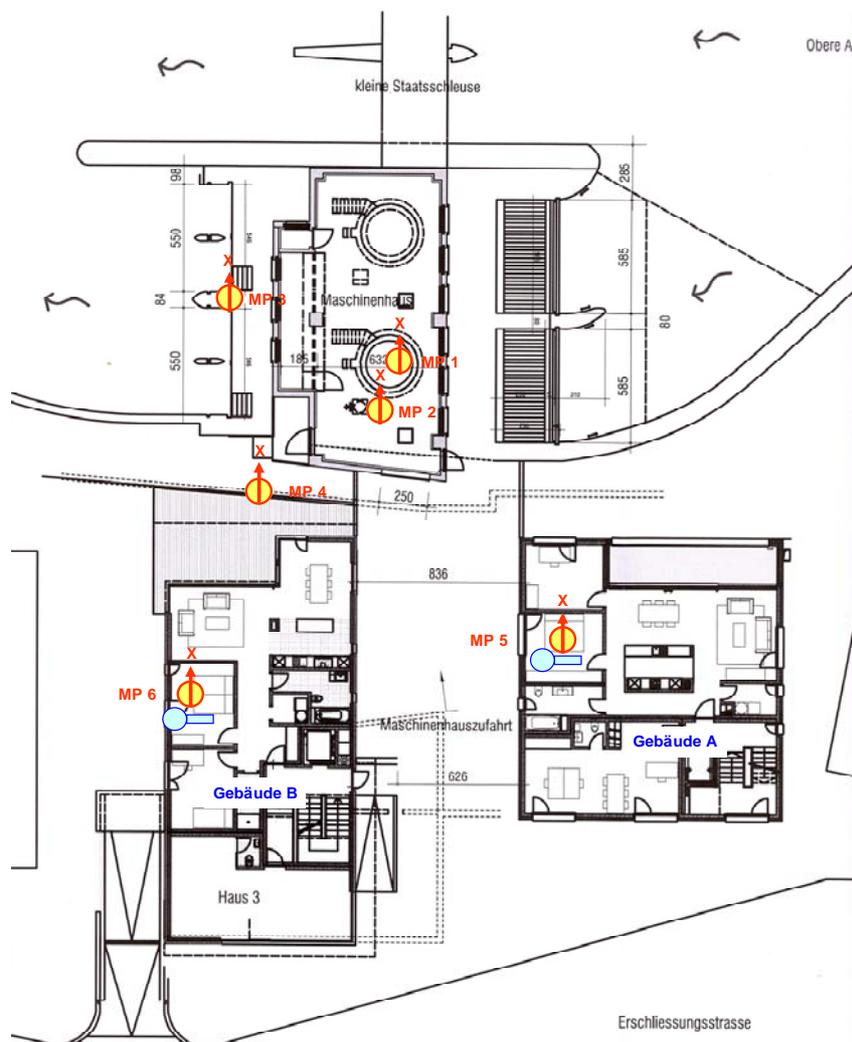


Bild 5.1 Position der Messpunkte: Generator (MP 1), Tragstruktur der Turbine (MP 2), Saugrohr (MP 3), Fundament der Nachbargebäude (MP 4), Zimmer im 2. OG im Gebäude A (MP 5, inkl. Schallmessung) und Zimmer im 2. OG im Gebäude B (MP 6, inkl. Schallmessung)

In Bild 5.2 sind die Amplitudenspektren der vertikalen Schwingung für die Messpunkte MP 1 bis 6 dargestellt. Anhand der Spektralform lässt sich die Ausbreitung der Erschütterung verfolgen.

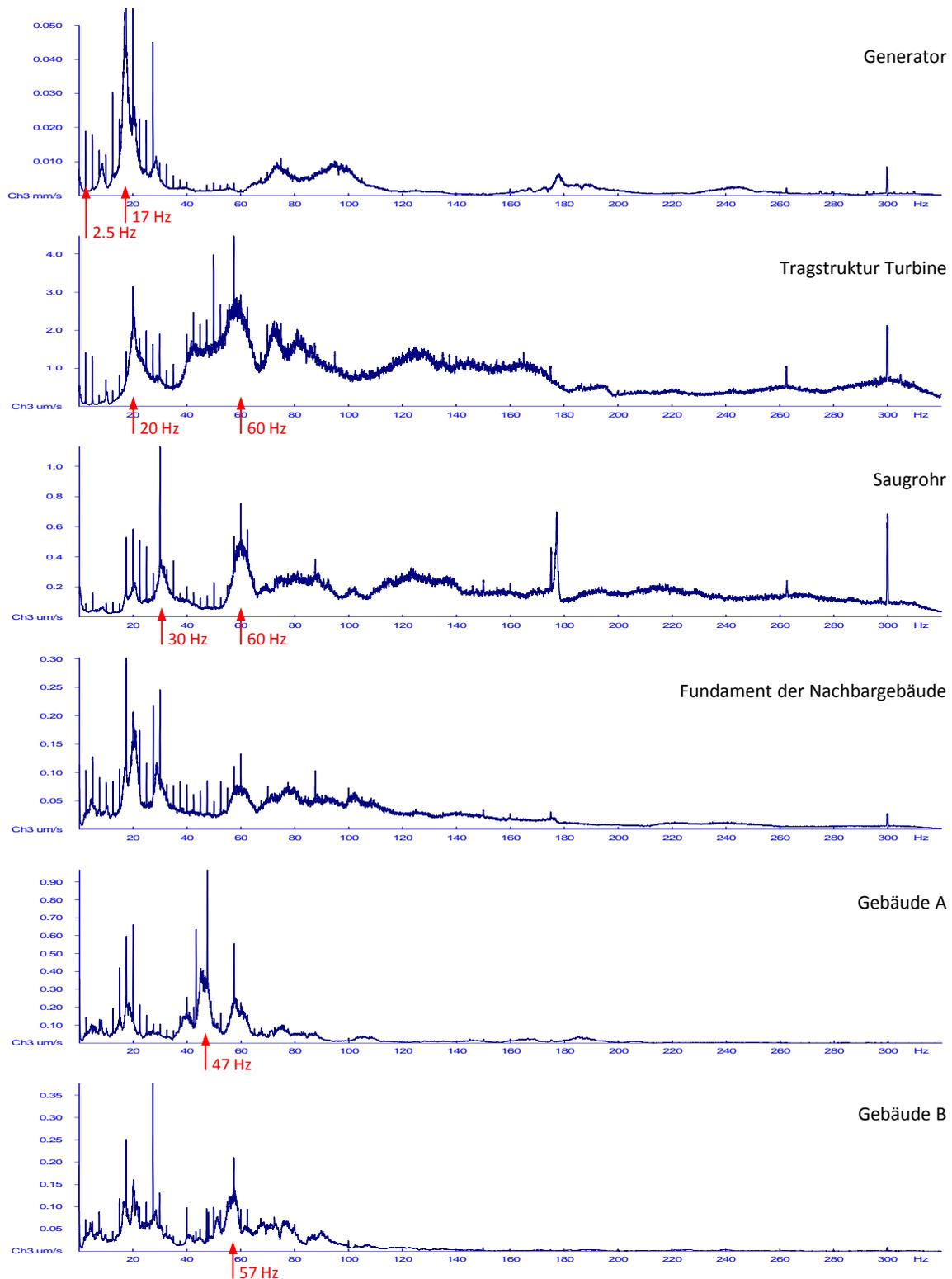


Bild 5.2 Amplitudenspektren der vertikalen Schwingung gemessen bei MP 1 bis MP 6 (von oben nach unten): Generator, Tragstruktur der Turbine, Saugrohr, Fundament der Nachbargebäude, Nachbargebäude A und Nachbargebäude B.

Die einzelnen „Nadeln“ sind charakteristisch für den rotierenden Generator. Sie sind bei allen Messpunkten zu erkennen. Dies bedeutet, dass die Erschütterungen dieser Aggregate bis in die Wohnungen weitergegeben werden. Der Peak bei 17 Hz beim Generator entspricht der Eigenfrequenz dessen Tragstruktur. Die Hauptenergie der Erschütterungen in den Wohnungen liegt allerdings nicht in diesen „Nadeln“ sondern wird durch die breitbandige, wellenartige Kurve dargestellt.

Diese wellenartigen Kurven erlauben folgende Interpretation:

- Bei der Tragstruktur der Turbine treten dominante Frequenzen bei 20 und bei 60 Hz auf, beim Saugrohr hingegen bei 30 und bei 60 Hz. Offensichtlich ist die Frequenz bei 20 Hz eine Eigenheit der Tragstruktur der Turbine und die Frequenz bei 30 Hz eine Eigenheit des Saugrohres. Die Frequenz bei 60 Hz ist bei beiden vorhanden und lässt sich nicht als Unterscheidungsmerkmal verwenden.
- Beim Fundament treten alle drei Frequenzspitzen auf, diejenige bei 20, bei 30 und bei 60 Hz. Dies bedeutet, dass die Erschütterungen im Gebäude zusätzlich zu den Vibrationen des Generators sowohl durch die Tragstruktur der Turbine als auch durch das Saugrohr verursacht werden. Auch lässt sich gut erkennen, dass bei höheren Frequenzen die Amplituden durch die frequenzabhängige Abminderung stärker gedämpft wurden als bei tiefen Frequenzen
- In der Wohnung im Gebäude A finden wir Frequenzspitzen bei 20 Hz, bei 47 Hz und bei 60 Hz. Die Spitze bei 47 Hz wird durch die Eigenfrequenz der Geschossdecke verursacht, obwohl beim Fundament die Amplituden um diese Frequenz eher klein sind. Die Frequenzspitze bei 20 Hz kommt vom Saugrohr. Die Frequenzspitze bei 60 Hz lässt sich, da sie sowohl beim Saugrohr als auch bei der Turbine auftritt, nicht eindeutig zuweisen.
- In der Wohnung im Gebäude B finden wir Frequenzspitzen bei 20 Hz und bei 60 Hz. Die Spitze bei 60 Hz wird durch die Eigenfrequenz der Geschossdecke bei 57 Hz verstärkt. Die Frequenzspitze bei 20 Hz kommt vom Saugrohr.

Das Beispiel zeigt, dass mit einer elastischen Lagerung der neuen Generatoren nur ein Teil der störenden Erschütterungen reduziert werden könnte.

In Bild 5.3 sind die in den Wohnungen gemessenen Terzbandspektren für die Erschütterung und den Schalldruck dargestellt. Die Erschütterungen weisen ihre Frequenzspitzen bei 50 und 63 Hz auf, der Schall hingegen bei 80 und 125 Hz. Diese Tatsache weist darauf hin, dass der Schall im Raum nicht primär durch die Erschütterungen des Fussbodens oder der Decke erzeugt wird, sondern durch andere Quellen wie z.B. die Wände oder durch Direktschall, der durch die Scheiben eindringt. Eine eindeutige Trennung zwischen Körperschall und Direktschall ist deshalb hier nicht möglich.

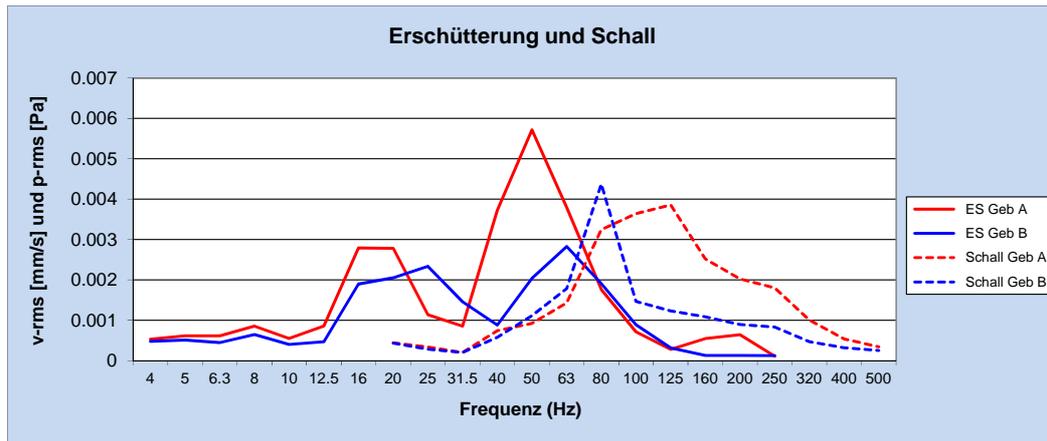


Bild 5.3 Terzbandspektren der Erschütterungen (ES) und des Schalldrucks jeweils in einem Zimmer im Gebäude A und B.

Aufgrund dieser Messungen wurde auf eine elastische Lagerung der Generatoren verzichtet, auch deshalb, weil die störenden Immissionen dadurch nicht gänzlich eliminiert würden. Interessant ist auch die Haltung eines Anwohners, der sich durch die Immissionen, obwohl sehr gut wahrnehmbar, nicht beeinträchtigt fühlt. Offenbar ist ihm bewusst, dass neben einem Kraftwerk mit störenden Immissionen zu rechnen ist und nimmt diese wegen der sonst sehr attraktiven Wohnlage mit Ausblick auf die Aare in Kauf.

6 Schlusswort

In diesem Bericht wird auf die Erschütterungs- und Körperschallproblematik bei Gebäuden neben Flusskraftwerken aufmerksam gemacht. Durch das Verständnis der physikalischen Grundlagen und durch Erfahrungen bei zahlreichen Projekten können typische Problembereiche verursacht durch die vom Kraftwerk ausgehenden Erschütterungen aufgezeigt werden. Diese sind neben dem rotierenden Generator auch andere Komponenten des Kraftwerks, insbesondere das Saugrohr, die unbekannt, eventuell sehr geringe Abnahme der Erschütterung mit der Distanz zum Kraftwerk und die geringen Werte der Erschütterung und des Körperschalls, die bei Anwohnern bereits als störend und nicht zumutbar wahrgenommen werden. Neben baulichen Massnahmen ist auch eine Berücksichtigung der Erschütterungs- und Körperschallproblematik in einer frühen Projektphase von grosser Wichtigkeit, um ungewollte Probleme im Nachhinein zu vermeiden. Auch führt eine frühe Einbindung ins Projekt nicht nur zur effizientesten, sondern oftmals auch kostengünstigsten Lösung.

Es ist die Pflicht der Bauingenieure, alle an einem Projekt beteiligten Personen auf die Erschütterungs- und Körperschallproblematik aufmerksam zu machen, sobald bei einem Flusskraftwerk selbst oder in dessen – wie gezeigt – weiteren Umgebung gebaut wird. Dabei sollen bereits kleine Umbauten beim Kraftwerk als eine Chance betrachtet werden, um eine schwingungstechnisch bessere Lösung als der Ist-Zustand zu realisieren.